



普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校工科力学系列教材

工程力学

赵永刚 杨静宁 宋 曦 主编
李世荣 主审



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校工科力学系列教材

工 程 力 学

赵永刚 杨静宁 宋 曦 主编
李世荣 主审

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是为满足目前课程学时压缩,教学第一线迫切需要相应学时的小篇幅教材,并依据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会,于2008年制定的“理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求(试行)”编写而成的。全书内容包括静力学、杆件基本变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定等14章内容。注重基础知识及工程应用,强化学生能力培养。书中例题类型多,每章后附有习题及答案。

本书可作为高等院校理工科各专业工程力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/赵永刚,杨静宁,宋曦主编. —北京:科学出版社,2010.2
(普通高等教育“十一五”规划教材·普通高等院校工科力学系列教材)
ISBN 978-7-03-026601-9

I. ①工… II. ①赵…②杨…③宋… III. ①工程力学-高等学校-教材
IV. ①TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第016244号

责任编辑:李鹏奇 孙明星 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

※

2010年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年1月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—4 000 字数:598 000

定价:40.00元(含练习册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

工程力学是高等学校工科专业的一门技术基础课,具有工程背景强、应用范围广等特点,也是高等院校工科专业的基础。

本书是为满足目前课程学时压缩,教学第一线迫切需要相应学时的小篇幅教材,并依据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会,于2008年制定的“理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求(试行)”,在总结多年教学经验的基础上编写而成的。本书编写按照“由浅入深、注重基础知识及工程应用相结合”的原则,针对高等工科院校的教师授课及学生学习特点,注重对分析问题、解决问题的思路及方法的总结;例题多、习题类型广,难度分布适当;力求“贴近现代工程实际,宜于教学”的编写风格,真正使之成为教师的“备课笔记”,学生的“学习指导书”。

本书由兰州理工大学赵永刚(第12、13、14章)、宋曦(绪论、第1、2、3、6章)、杨静宁(第9、10、11章)、马连生(第4、5、7、8章、附录I、附录II)编写。全书由兰州理工大学李世荣主审。

本书是普通高等院校工科力学系列教材之一,在编写和出版过程中得到了兰州理工大学教务处以及工程力学系的支持。为使本书顺利出版,科学出版社的同志们付出了辛勤的劳动,做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,参考了国内外一些优秀教材,在此也向这些教材的编者致谢!

限于水平,书中的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009年9月

目 录

前言	
绪论	1
第一篇 静力学	
引言	4
第1章 物体的受力分析	6
1.1 静力学公理	6
1.2 常见的约束类型及其约束力	8
1.3 物体的受力分析	11
小结	14
习题	14
第2章 平面汇交力系和平面力偶系	17
2.1 平面汇交力系	17
2.2 平面力对点之矩	23
2.3 平面力偶系	24
小结	27
习题	28
第3章 平面任意力系	32
3.1 平面任意力系向一点的简化	32
3.2 平面任意力系的平衡	37
3.3 物体系统的平衡	39
3.4 平面桁架的内力计算	45
小结	49
习题	50
第4章 空间力系	55
4.1 空间汇交力系	55
4.2 空间力偶系	58
4.3 空间力对点的矩和力对轴的矩	59
4.4 空间任意力系的简化和平衡	61
4.5 重心	66
小结	70
习题	71
第5章 摩擦	74
5.1 滑动摩擦	74

5.2 摩擦角和自锁现象	76
5.3 考虑摩擦时的平衡问题	77
* 5.4 滚动摩擦	80
小结	82
习题	82

第二篇 材料力学

引言	85
第6章 轴向拉伸与压缩	92
6.1 实例及基本概念	92
6.2 轴力及轴力图	92
6.3 轴向拉压杆截面上的应力	94
6.4 材料在拉伸压缩时的力学性能	97
6.5 应力集中的概念	101
6.6 轴向拉压杆的强度计算	102
6.7 轴向拉压杆的变形	104
6.8 拉压超静定问题	109
* 6.9 温度应力和装配应力	111
小结	114
习题	114
第7章 连接件的实用计算	119
7.1 实例及基本概念	119
7.2 剪切与挤压实用计算	120
小结	123
习题	124
第8章 扭转	127
8.1 实例及基本概念	127
8.2 外力偶矩 扭矩 扭矩图	127
8.3 薄壁圆筒的扭转	130
8.4 圆轴扭转时的应力	132
8.5 圆轴扭转时的变形	136
* 8.6 非圆截面杆的扭转	138
小结	141
习题	141
第9章 弯曲内力	145
9.1 概述	145
9.2 弯曲内力	146
9.3 剪力图和弯矩图	150
9.4 分布载荷集度、剪力和弯矩间的关系	154

9.5	按叠加原理作弯矩图	157
* 9.6	平面刚架的内力图	159
	小结	160
	习题	161
第 10 章	弯曲应力	165
10.1	概述	165
10.2	纯弯曲时梁横截面上的正应力	165
10.3	横力弯曲时梁的正应力 正应力强度条件	169
10.4	弯曲切应力计算	173
10.5	弯曲切应力的强度校核	179
10.6	提高梁弯曲强度的主要措施	180
	小结	185
	习题	186
第 11 章	弯曲变形 超静定梁	191
11.1	概述	191
11.2	梁的挠曲线近似微分方程	192
11.3	求梁变形的积分法	193
11.4	用叠加法计算弯曲变形	200
11.5	简单超静定梁	203
11.6	刚度条件 提高梁弯曲刚度的主要措施	207
	小结	212
	习题	213
第 12 章	应力状态和强度理论	218
12.1	应力状态的基本概念	218
12.2	二向应力状态分析的解析法	220
12.3	二向应力状态分析的图解法	223
12.4	三向应力状态及其应力圆	227
12.5	广义胡克定律	229
12.6	应变能密度	232
12.7	强度理论概述	233
12.8	四种常用的强度理论	234
12.9	各种强度理论的应用	239
	小结	241
	习题	243
第 13 章	组合变形	248
13.1	组合变形和叠加原理	248
13.2	斜弯曲	249
13.3	拉伸(或压缩)与弯曲的组合	251
13.4	弯曲与扭转的组合	255

小结.....	257
习题.....	257
第 14 章 压杆稳定	263
14.1 稳定性的概念.....	263
14.2 两端铰支细长压杆的临界压力.....	265
14.3 其他支座条件下细长压杆的临界压力.....	267
14.4 临界应力.....	270
14.5 压杆的稳定校核.....	273
14.6 提高压杆稳定性的措施.....	275
小结.....	277
习题.....	278
参考文献.....	283
附录 I 平面图形的几何性质.....	284
附录 II 型钢表.....	297
习题答案.....	310

绪 论

工程力学涉及众多的力学学科分支与广泛的工程技术学科,与工程实际紧密联系。作为高等院校工科专业的一门技术基础课程,它主要包括了静力分析和构件承载能力分析两部分内容。

一、工程与工程力学

在工农业生产、建筑、交通运输、航空航天等工程中,广泛地运用各种机械设备和工程结构,各种机械设备和工程结构都是由基本的零件或部件按照一定的规律组成的,这些零件或部件统称为构件。如机械中的轴、杆件,在道路桥梁工程、房屋建筑工程中的梁、柱等。这些构件互相支承、互相约束,构成一个整体结构。如图所示的是门式起重机(图 0-1)、空间网架结构(图 0-2)。

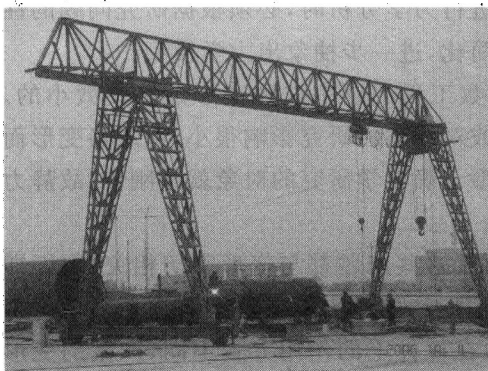


图 0-1

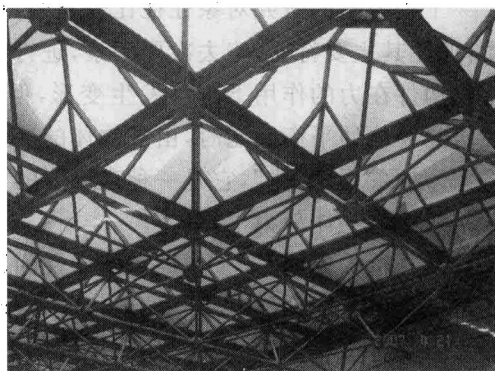


图 0-2

工程实际中构件的几何形状是各式各样的,根据其几何形状和几何尺寸可以大致分为杆、平板、壳和块体四类。

凡是一个方向的尺寸远大于其他两个方向的尺寸的构件称为杆;若一个方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸的构件称为板;平分这种构件厚度的面称为中面,中面为平面的称为平板,中面为曲面的则称为壳;三个方向(长、宽、高)的尺寸相差不多(属同量级)的构件称为块体。

二、工程力学的主要内容与分析模型

1. 工程力学的主要内容

工程力学所包含的内容极其广泛,本书所讨论的“工程力学”只包含静力学和材料力学两部分。

静力学是工程力学的基础部分,是学习工程力学以及其他一些技术科学的基础,主要

研究物体在力系作用下的平衡规律。主要解决三类问题：物体的受力分析；力系的简化（或力系的合成）问题；力系的平衡问题。

材料力学主要研究构件变形与所受力之间的关系，以及这些变形对构件的正常工作将会产生什么影响。每个构件都是由一定的材料构成的，若构件所承受的载荷超过材料的承载能力，构件就会产生过大的变形或断裂而不能继续正常工作，即失效。要保证构件能够安全、正常地工作，构件都必须具有足够的承载能力。构件的承载能力包括强度、刚度和稳定性三个方面。

所谓“强度”，是指构件抵抗破坏的能力；所谓“刚度”，是指构件抵抗变形的能力；所谓“稳定性”，是指构件保持原有平衡形态的能力。

实际设计构件时，不但要满足强度、刚度和稳定性三方面的要求，同时，还必须尽可能地合理选用材料和降低材料的消耗量以节约资金或减轻构件的自重。前者往往要求用较多或较好的材料，后者则要求用较少或价廉的材料，两者之间存在着矛盾。材料力学的任务就在于力求合理地解决这种矛盾。

2. 工程力学的两种分析模型

工程力学的研究对象往往比较复杂，在对其进行力学分析时，必须根据研究问题的性质，抓住其主要特征，略去次要因素，进行合理的简化，进一步抽象出力学模型。

构件在力的作用下都将发生变形，但在大多数工程问题中这种变形是极其微小的。在研究物体的平衡问题时，由于物体的变形很小或对问题的研究影响很小，可忽略变形而将物体抽象为“刚体”，它是一种理想化的力学模型。静力学研究的对象就是刚体，故静力学一般称为刚体静力学。

当分析构件的强度、刚度和稳定性问题时，由于这些问题都与变形密切相关，因而即使是极其微小的变形也必须加以考虑，这时就必须把物体作为可变形固体进行分析。工程力学仅分析可变形的杆件或简单的杆系。外力在杆件上的作用方式不同，产生的变形也将不同，归纳起来有四种基本变形形式，即轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲。杆件其他复杂的变形都可以看成上述基本变形的组合。

三、工程力学的研究方法

工程力学和其他任何一门学科一样，就其研究方法而言，都不可能离开认识过程的客观规律。即从实践出发或实验观察，经过抽象、综合和归纳，建立公理或提出基本假设，再用数学演绎和逻辑推理得到定理和结论，然后再通过实践来验证理论的正确性。研究方法主要包括：

1. 理论分析方法

在建立力学模型的基础上，根据公理、定律和基本假设，运用数学方法进行分析计算，考虑到问题的具体条件，得到具有物理意义和实用价值的定理和结论。

需要指出的是，静力学中所采用的某些原理和方法在材料力学中分析变形问题时是不适用的。

2. 实验分析方法

许多工程实际问题,仅靠理论分析方法还不能有效解决。但通过实验的方法可得到满意的结果。另外,在解决构件的承载能力问题时,需要通过专门的试验机测定不同材料的弹性常数、材料的物理关系。可见,实验方法也是解决工程力学问题的一个必不可少的分析方法。

3. 计算机分析方法

随着计算机技术的迅速发展,计算机分析方法已使过去一些理论上难以解决的问题逐步得以解决。而且,即使是传统的理论方法和实验方法也要借助于计算机。在理论分析中,人们可以借助计算机进行复杂的工程计算。在实验研究中,计算机为实验数据的采集、整理和参数的选择提供了方便。因此,试验分析、理论研究和计算机分析方法都是工程力学解决问题的重要手段。

第一篇 静 力 学

引 言

一、几个基本概念

静力学研究物体在力系作用下的平衡规律。

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体发生运动状态变化和形状变化。前者称为力的运动效应或力的外效应,后者称为力的变形效应或力的内效应。力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点三个要素,故力应以矢量表示,一般用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。

力系是指作用在物体上的若干个力。工程中常见的力系,按其作用线所在的位置,可以分为平面力系和空间力系;又可以按其作用线的相互关系,分为共线力系、平行力系、汇交力系和任意力系。

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或匀速直线运动。它是机械运动的特殊形式。平衡是相对的,在工程实际中通常把固连于地球的参考系作为惯性参考系来研究物体相对于地球的平衡问题,其分析计算的结果具有足够的精确度,也能较好地与实际情况相吻合。

刚体是指在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型。事实上,任何物体受力后或多或少都会发生变形,并不存在绝对的刚体。但是,对那些在运动中变形极小,或虽有变形但对其整体运动影响较小的物体,忽略其变形,对问题的研究结果不仅没有显著影响,而且可以使问题得以简化,这时,该物体可抽象为刚体。将物体抽象为刚体是有条件的,这与所研究的问题的性质有关,当物体的变形(即使很小)成为所研究问题的主要方面而不能忽略时,则不能抽象成为刚体,而应按变形体处理。

二、静力学研究的三类问题

1. 物体的受力分析

分析物体或物体系共受几个力,以及每个力的作用位置和方向。

2. 力系的等效替换或简化

作用于物体上的力系可以用另一个与它作用效果相同的力系来代替,这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,则称为力系的简化。如果

一个力系与一个力等效,则此力称为该力系的合力,而该力系的各个力称为此力的分力。

3. 力系的平衡条件及其应用

研究物体处于平衡时,作用于物体上的力系所应满足的条件。

物体的受力分析是解决力学问题的关键,研究力系等效替换是便于了解力系对物体作用的总效应,并为导出各种力系的平衡条件作准备。利用平衡条件求解物体或物体系的平衡问题,则是静力学的核心问题。

静力学在工程实际中有着广泛的应用,利用平衡条件求解平衡问题所得的结果是设计结构、机械零件的计算依据。

第 1 章 物体的受力分析

本章将介绍静力学公理,并阐述工程中常见的约束和约束力的分析,重点是物体的受力分析和受力图的绘制。

1.1 静力学公理

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点,合力的大小和方向,由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定。如图 1-1(a)所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的矢量和,即

$$\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 \quad (1-1)$$

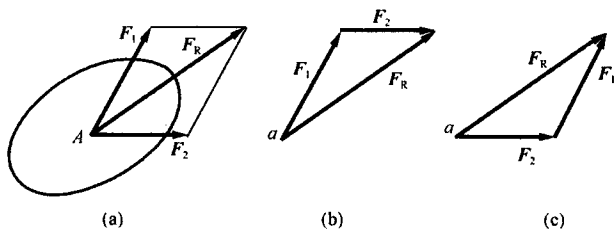


图 1-1

为简便起见,求合力的大小和方向时,也可以用力的平行四边形的一半来表示合成的过程。即由任意一点 a 起,作出一力三角形,如图 1-1(b)或(c)所示,力三角形的两个边分别为 $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$,第三边 $\boldsymbol{F}_R$ 即代表合力矢量,这种求合力的方法称为力的三角形法则。应注意,力三角形只表示力的大小和方向,而不表示力的作用点或作用线,合力作用点仍在原来的汇交点 A 。

力的平行四边形法则与力的三角形法则表明了最简单的力系简化的规律,是复杂力系简化的依据。

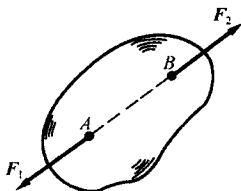


图 1-2

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力(如 $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$),使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,如图 1-2 所示。即

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2 \quad (1-2)$$

此公理揭示了作用于刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件。

在工程实际中,我们把只受两个力作用而处于平衡的物体,称为二力构件(或简称二

力杆),如图 1-3(a)、(b)所示。根据二力平衡条件可知,二力构件不论形状如何,其所受的两个力的作用线,必沿两力作用点的连线。这一性质在对物体进行受力分析时极为重要。

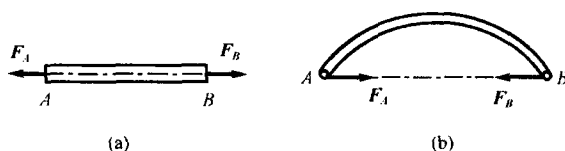


图 1-3

公理 3 加减平衡力系原理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效果。

这个公理是研究力系的等效替换与简化的重要依据。但必须注意,此公理只适用于刚体而不适用于变形体。

由上述公理可以导出如下推论:

推论 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力,可沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

证明: 如图 1-4(a)所示的刚体,在 A 点受力 F 作用,若在力 F 的作用线上任一点 B 加上一平衡力系 F_1, F_2 ,且使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-4(b)所示,则 F 与 F_1 又构成一平衡力系。根据公理 3 将此力系去掉,得到作用于 B 点的力 F_2 ,如图 1-4(c)所示。于是,原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 及力 F_2 等效,即原作用于 A 点的力 F 沿其作用线移到了 B 点。

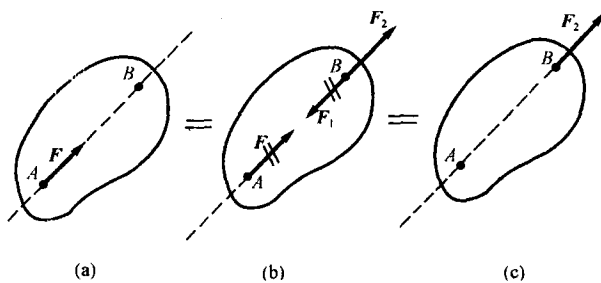


图 1-4

根据力的可传性,力对刚体的效应与力的作用点在其作用线上的位置无关。因此,对于刚体来说,力的三要素之一的作用点可代之以作用线。在这种情况下,力矢量可沿其作用线任意滑动,这种矢量称为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

刚体在三个力作用下处于平衡,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明: 设刚体在三个力 F_1, F_2, F_3 作用下平衡,其作用点分别为 A、B、C 三个点,如

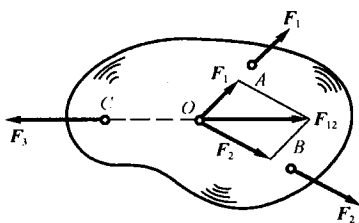


图 1-5

图 1-5 所示。已知 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点, 根据力的可传性, 将 F_1 和 F_2 移到汇交点 O , 并用力的平行四边形法则, 求得其合力 F_{12} 。则 F_3 应与 F_{12} 平衡, 根据二力平衡条件 F_3 与 F_{12} 共线, 即力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面, 且通过力 F_1 和 F_2 的汇交点 O 。

三力平衡汇交定理说明了不平行的三个力平衡的必要条件, 可利用此定理来确定第三个力的作用线的方位。

公理 4 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在, 两力的大小相等, 方向相反, 沿着同一直线, 分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力, 用 F' 表示反作用力, 则

$$F = -F' \quad (1-3)$$

这一公理概括了物体间相互作用力的关系, 表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上, 不能视为平衡力系。这是物体受力分析时必须遵循的原则。

1.2 常见的约束类型及其约束力

一、约束

在力学中通常把物体分为两类: 一类称为**自由体**, 它们在空间的位移不受任何限制。例如在空中飞行的飞机、炮弹和火箭等; 另一类称为**非自由体**, 它们在空间的位移受到一定的限制。例如, 悬挂在屋顶的电灯受到绳子的限制不能下落; 门、窗只能绕合页轴转动; 如图 1-6 所示的桥梁, 由于受到左右支座的限制而不能任意移动等。工程实际中的构件或机械零件都是非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为**约束**。约束是以物体相互接触的方式构成的。例如, 绳子是电灯的约束; 合页是门、窗的约束; 支座是桥梁的约束。

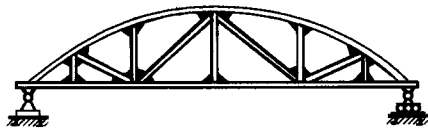


图 1-6

约束对于物体的作用, 实际上就是力, 这种力称为**约束力**。除约束力以外, 作用于物体上的重力、水压力、土压力、风力、电磁力等, 这些力一般是给定的, 它不取决于物体上其他的力, 称为**主动力**。

通常约束力是未知的, 约束力的大小和方向不能预先确定, 只能由约束的性质和主动力状况来决定, 因此确定约束力就成为力学分析的重要任务之一。确定约束力方向的准则是约束力的方向总是与该约束所能阻碍的位移方向相反。应用这个准则, 可以确定约束力的方向或作用线的位置。至于约束力的大小, 在静力学问题中, 约束力和物体受到的其他主动力组成平衡力系, 因此可用平衡条件求出约束力。

二、工程中常见的约束类型

下面介绍工程中常见的几种约束的实例、简化记号及对应的约束力的表示方法。

1. 柔性体约束

柔性体约束是由绳索、胶带或链条等柔性物体构成的。这类约束的性质决定了它只能承受拉力,所以它给物体的约束力也只能是拉力。因此,柔性体约束对物体的约束力,作用在接触点,方向沿着柔性体背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束力。

如图 1-7(a)所示,用绳索悬挂一重物,则绳索对重物的约束力是沿绳索的拉力 F_{T1} 和 F_{T2} ,如图 1-7(b)所示。

2. 光滑接触面约束

光滑接触面约束是将接触表面视为理想光滑的约束。此时,不论接触面是平面或曲面,都不能限制物体沿约束表面切线方向的位移,而只能限制物体沿着接触表面法线方向并向约束内部的位移。因此,光滑接触面对物体的约束力通过接触点,方向沿接触表面的公法线,并指向被约束的物体,这种约束力称为法向约束力,通常用 F_N 表示。如图 1-8 中所示支持物体的固定面、啮合齿轮的齿面都可视为光滑接触面,它们的约束力分别为 F_{NA} 和 F_{NB} 。

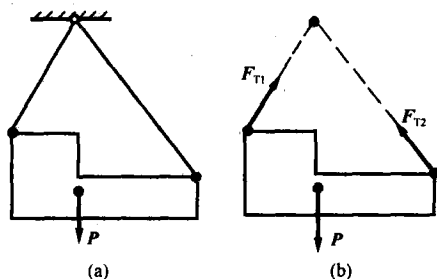


图 1-7

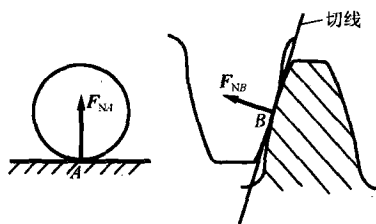


图 1-8

3. 光滑铰链约束

这类约束是工程中最常见的,主要包括向心轴承、圆柱形铰链和固定铰链支座等。

1) 向心轴承

向心轴承的结构如图 1-9(a)、(b)所示,图 1-9(c)为其结构简图。轴可在孔内任意转动,也可沿孔的中心线移动;但是,轴承阻碍着轴沿径向向外的位移。当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴的约束力 F_A 作用在接触点 A ,且沿公法线指向轴心,如图 1-9(a)所示。

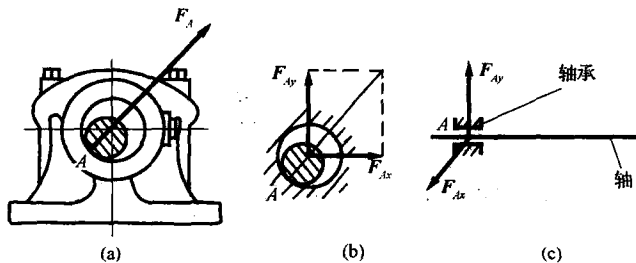


图 1-9